



Le contrôle paramétrique, un outil de modélisation pour les mouvements évolutifs complexes et l'autonomie

Ali Allaoui, Matthieu Evrard, Annie Luciani

► To cite this version:

Ali Allaoui, Matthieu Evrard, Annie Luciani. Le contrôle paramétrique, un outil de modélisation pour les mouvements évolutifs complexes et l'autonomie. Journées de l'Association Francophone d'Informatique Graphique, 2006, Bordeaux, France. pp.153-160. hal-00910673

HAL Id: hal-00910673

<https://hal.science/hal-00910673>

Submitted on 1 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le contrôle paramétrique, un outil de modélisation pour les mouvements évolutifs complexes et l'autonomie

Ali Allaoui, Matthieu Evrard, Annie Luciani, Acroe-ICA

I. Résumé

La modélisation de formes tridimensionnelles est aujourd'hui très développée, la modélisation physique pour l'animation l'est en revanche beaucoup moins. Dans ce cadre, le contrôle du mouvement est un point délicat. On recherche à la fois un contrôle plus fin pendant la simulation et la possibilité de composer avec un modèle actif et non plus passif. Un certain nombre de techniques ont été mises au point, mais toujours au service d'un effet particulier. Cet article propose d'introduire de manière générique le contrôle actif de paramètres physiques pour un modèleur physique particulière. Un module générique de contrôle de paramètres a été conçu pour le formalisme Cordis-Anima et fait partie intégrante de la modélisation d'un réseau de masses-interactions. Deux exemples caractéristiques, le contrôle de la dynamique d'un saut et le contrôle de la dynamique d'une fracture lors d'un étirement (striction), illustreront la méthode et ses résultats.

Mots clé: modèle physique, simulation, animation, réseau masses-interactions, langage d'animation

II. Introduction

Certains mouvements complexes, comme les changements d'état ([TPK89]) ou la croissance cellulaire ([BL03]), ont été synthétisés grâce à l'association du modèle physique et du contrôle paramétrique. C'est également le cas pour un grand nombre de mouvements autonomes, du ver de Miller ([Mil88]) jusqu'aux réseaux de senseurs-actuateurs de Van de Panne([PF93],[PKF94]). Mais dans toutes ces réalisations, le but était de produire un effet, un comportement bien précis, et non pas de proposer à l'animateur un outil avec lequel il puisse lui-même construire un modèle à même de produire de tels comportements. Ceci est particulièrement clair dans le contrôle de haut niveau que propose Terzopoulos dans ses

modèles de contrôle de la motricité ([TT94], [GT95], [GTH98]). Nous proposons dans cet article un outil générique pour le contrôle de paramètres physiques en ligne, convaincus qu'il permet d'exploiter des nouvelles possibilités de modélisation, ceci de manière intuitive grâce à son aspect modulaire en tant que nouvel élément du système de modélisation et de simulation Cordis-Anima.

III. Contrôle du mouvement et contrôle de paramètres

Principales modalités de contrôle du mouvement

Contrôler le mouvement : cette préoccupation est centrale pour l'animateur dans sa tâche de *mimesis*, de re-présentation. Il s'agit de définir un comportement et d'avoir prise sur son évolution. Cette tâche est complexe et il existe de nombreux moyens de l'accomplir. Cette évolution peut être contrôlée de trois manières différentes :

1.Prédéfinie : on utilise alors une fonction d'évolution, où une variable quelconque (position, force, paramètre physique) voit son évolution décrite au cours du temps.

2.Déterminée en ligne par l'animateur : c'est la situation d'interactivité. Cette interaction avec le modèle peut être effectuée de manière unidirectionnelle, sans retour du modèle sur le geste. C'est notamment le cas de la "motion capture". Une interface gestuelle à retour d'effort permet cependant d'établir une véritable interaction gestuelle à double sens entre l'animateur et son modèle. Dans les deux cas, il faut veiller à transformer de manière cohérente la variable donnée en entrée par l'animateur (position, force,...) en une variable correspondant au contrôle désiré, qui peut être d'une toute autre nature(paramètre physique).

3.Définie à chaque instant par l'état du système: l'animateur définit au sein du modèle les conditions de son évolution. Ce contrôle peut être vu à deux échelles différentes:

- A l'échelle du comportement lui-même : la dynamique des paramètres physiques contrôlés définit alors le comportement.

- À l'échelle de l'évolution du comportement : tout se passe comme si le système s'automodifiait, ce qui dans le cas du mouvement autonome est en général considéré comme une fonction du programme moteur (modification du tonus, des elongations, etc..).

Ces trois modalités sont très générales. Examinons à présent comment le cas spécifique du contrôle de paramètres répond aux exigences du modélisateur.

Les 3 niveaux de contrôle paramétrique

Le mot paramètre désigne dans cet article les paramètres physiques au sens large (masse, raideur, viscosité, seuil en distance, en vitesse ou en force, et plus généralement tout paramètre d'une interaction).

Le contrôle de paramètre est souvent présenté en tant que tel, soit dans une approche mathématique (oscillateur de Van de Pol par exemple [BPV88]), soit parce qu'il produit des effets particuliers (modélisation du mouvement péristaltique par exemple [Mil88]). Dans le cadre de la modélisation générique et de la simulation temps réel interactive, il importe de distinguer trois niveaux de contrôle de paramètres :

1. Le contrôle peut d'abord être vu comme une détermination des paramètres avant la simulation. On s'intéresse alors aux méthodes qui visent à déterminer ces paramètres pour produire le comportement le plus proche du comportement attendu. (e.g. les algorithmes génétiques).

2. Le contrôle peut également être vu comme une dépendance des valeurs des paramètres d'une interaction vis-à-vis de son état interne, une interaction ayant un nombre fini d'états, et un état étant défini par les variables extensives et intensives manipulées (e.g. $K=K_1$ si condition(distance, vitesse)). Mais ici l'évolution des paramètres ne peut être continue, de telles liaisons étant définies comme des liaisons linéaires par morceaux ou par le moyen d'automates d'état finis. Ce contrôle discontinu a comme inconvénient important de poser des problèmes énergétiques difficiles à maîtriser lors des transitions.

3. On peut enfin définir le contrôle de paramètres de manière très générale.

Les valeurs des paramètres sont alors fonction de variables quelconques, et sont ainsi calculées à chaque pas de la simulation: par exemple pour l'élasticité K , $K(t)=K(x(t))$. On

peut ici se placer dans n'importe laquelle des trois modalités de contrôle du mouvement définies plus haut. Ce dernier niveau permet un contrôle continu des paramètres.

C'est ce dernier niveau que nous avons implémenté au sein de CORDIS-ANIMA et MIMESIS.

IV. CORDIS-Anima et MIMESIS

CORDIS-ANIMA est un système de modélisation et de simulation d'objets physiques, basé sur une discrétisation des lois de la physique newtonienne ([LJFCR91]). Le principe central est celui de la modularité: le "vocabulaire" du langage est constitué de modules autonomes remplissant chacun une fonction physique bien déterminée reliés entre eux pour représenter des interactions dynamiques. Le paradigme de la modularité garantit la souplesse et la généralité du système. Décrivons le rapidement.

CORDIS-ANIMA manipule deux variables duales, la force et la position, respectivement variable intensive et extensive. La communication entre les modules se fait exclusivement par l'intermédiaire de ces variables, via des points de communication. Ceux-ci sont de deux types:

- Les points M reçoivent une force et renvoient une position;
- Les points L reçoivent une position et renvoient une force.

Le langage permet a priori de créer tout module comportant au moins un point de communication. Cependant, en raison des règles de construction de CORDIS-ANIMA, qui garantissent le sens physique des objets [CLF90], seuls deux types de modules élémentaires sont directement intéressants par les possibilités de conception qu'ils offrent. Le point matériel (ou <MAT>) comporte un seul point M; l'élément de liaison (ou <LIA>) comporte lui deux points L. Un module <MAT> est donc un point matériel caractérisé par sa position, tandis qu'un module <LIA> constitue une liaison entre exactement deux <MAT>, c'est à dire une interaction physique. Les variables circulent entre les modules, la sortie d'un <MAT> devenant l'entrée d'un <LIA> et inversement.

L'interaction (ou <LIA>) calcule d à partir des positions de M_1 et M_2 et v_r à partir des positions actuelles et retardées de M_1 et M_2 (schéma de discrétisation avec vitesse retardée).

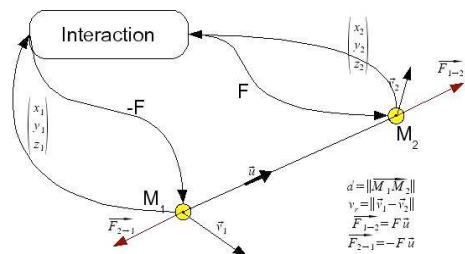


Figure 1: Interaction Cordis-Anima 3D

Une interaction se caractérise de manière standard comme une sommation de deux fonctions, une fonction $f1$ potentielle et une fonction $f2$ dissipative :

$$F = f1(d) + f2(v_r)$$

Chacune de ces fonctions peut se représenter par des fonctions linéaires par morceaux.

Avec ces deux éléments de base, CORDIS-ANIMA permet de construire des réseaux de masses-interactions, d'où le terme de modélisation physique particulière.

MIMESIS est un outil de conception interactif de modèles Cordis-Anima pour l'image animée ([ELC06]). On y manipule notamment des masses ponctuelles fixes (SOL), mobiles (MAS), ou encore n'ayant qu'un degré de liberté (MASX, MASY, MASZ). Dans MIMESIS, l'utilisateur dispose d'un certain nombre d'interactions typiques, dont les principales sont:

L'interaction ressort-frottement

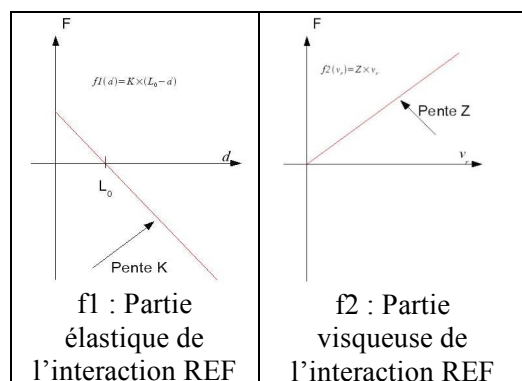


Figure 2: caractéristiques de la liaison REF

$f2$ a toujours cette forme, à savoir, même si Z change, l'ordonnée à l'origine est toujours nulle. De plus Z varie en fonction de d et non

en fonction de v_r , on représentera donc ainsi les interactions :

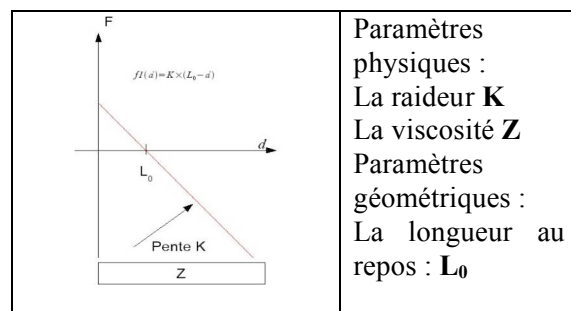


Figure 3 : La liaison REF

La liaison butée est la plus élémentaire des interactions non-linéaires, elle modélise le contact à travers une interaction visco-élastique en dessous d'un certain seuil:

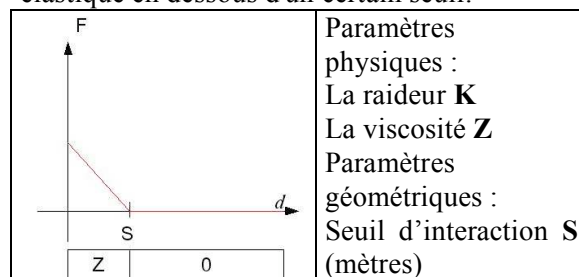


Figure 4 : La liaison BUT

D'autres liaisons non linéaires sont à disposition du modélisateur, ce sont toujours des liaisons linéaires par morceaux (LLM), on retrouve ainsi les interactions de répulsion, d'attraction et de cohésion. Ces liaisons ayant la même base CORDIS, il est aussi proposé à l'utilisateur de concevoir sa propre LLM.

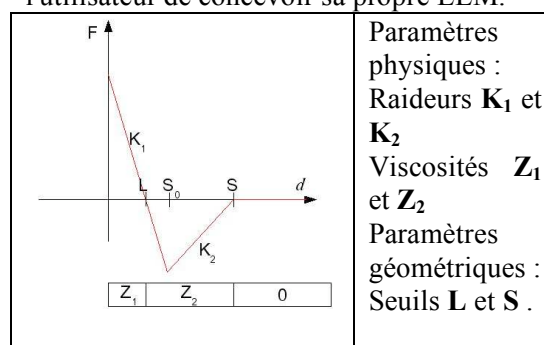


Figure 5: La liaison de cohésion

V. Le module de contrôle de paramètres

Notre but est à présent de proposer une extension du formalisme Cordis-Anima, le module de contrôle de paramètres, de manière cohérente et intuitive. La généralité de ce

module pose certaines questions importantes sur son interprétation physique.

Spécification Cordis

Une première spécification, très générale, du module de contrôle de paramètres (MCP) a été faite dans [CLF90]. Elle définit des nouveaux points de communication : les entrées de paramètres et les sorties de paramètres. Les premiers se trouvent sur les modules dont on modifiera le paramètre. Les seconds se trouvent bien évidemment sur les MCP. Un MCP possède "un certain nombre de points M ou L qui les rendent connectables aux points L ou M engendrant le contrôle". Compte tenu de la nature scalaire des paramètres, cette généralité est en fait inutile. La spécification minimale nécessaire que nous avons donnée pour le MCP est donc la suivante :

1. De restreindre les points de connexion aux points engendrant le contrôle à un point L pour avoir une entrée en position.
2. Le MCP ne peut produire qu'un scalaire et ne peut avoir comme entrée qu'un scalaire.
3. Seuls les LIA, modules d'interaction, sont concernés par le contrôle de paramètre, puisque la modification de l'inertie dans un système est d'utilisation rare.

Ensuite, le fonctionnement d'un MCP est déterminé par deux caractéristiques :

- La dimension de la masse à laquelle il est connecté : X, Y, Z ou 1D scalaire. Cette dimension caractérise la variable scalaire prise en entrée. On l'appellera p .
- Le traitement effectué sur ce p .

Trois traitements ont été implantés : identité, linéaire et exponentiel.

Un MCP peut donc avoir plusieurs paramètres, dans les cas restreints ci-dessus, deux réels A et B suffisent :

- Fonction linéaire : $f(p) = A \cdot p + B$
- Fonction exponentielle : $f(p) = \exp(A \cdot p + B)$

On aboutit donc neuf types de MCP.

Toutes les vérifications syntaxiques (eg. $L > 0$) doivent, ici également et comme toujours, être effectuées dans MIMESIS. Dans le cas contraire les conséquences de telles erreurs de syntaxe sont à la charge du modélisateur.

Spécification Mimesis

Dans Mimesis, trois nouveaux modules ont été implantés, pour les trois types de traitement prévus : CPI, CPL, CPE.

Lors de la conception du modèle physique, l'utilisateur les intègre au réseau de masses-interactions, à l'aide d'une fonction contrôler.

Exemple :

`contrôler(K, ma_ref, ma_mas1Dy, mon_cpe)` signifie "contrôler la raideur K de la liaison ma_ref avec ma_mas1Dy via mon_cpe ". Il en résulte $K = K(p) = \exp(A \cdot p + B)$

Interprétation physique du contrôle d'un paramètre

Le contrôle d'un paramètre peut avoir plusieurs incidences :

1. La modification du paramètre en maintenant les autres paramètres constants. La figure 7 suivante gauche montre la modification du paramètre « seuil » en maintenant la valeur de l'élasticité constante.
2. La modification du paramètre entraînant en conséquence la modification d'autres paramètres. La figure 7 suivante droite montre la modification du paramètre « seuil » avec modification conséquente de la valeur de l'élasticité.

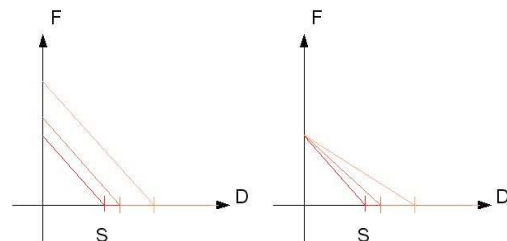


Figure 7: Contrôle « simple » et contrôle « conjoint » du seuil de la butée

La manipulation de deux paramètres conjoints (par exemple S et K) par manipulation directe de l'un deux (ici S) et indirect de l'autre (ici K) n'est pas toujours évidente à interpréter physiquement. Dans le changement décrit dans la figure 7 droite, un changement géométrique, par exemple la taille de l'objet donné par le seuil de la butée, produit un changement d'élasticité, donc un changement dans la matière. À l'inverse, le changement décrit dans la figure 7 gauche augmente un seuil sans changer ni l'élasticité, et simule ainsi un objet qui change de taille sans changer de matière.

Le processus de modification de paramètres est donc à prendre avec précaution dans le processus de modélisation, en particulier l'incidence du (ou des) paramètres modifiés sur la nature de l'objet modélisé. Dans cette tâche délicate, l'interface utilisateur a le rôle important d'aider à la maîtrise de l'interprétation physique. Par exemple, pour la liaison cohésion, le raisonnement physique amène à dire que le critère important est la zone de cohésion, bien plus que les paramètres individuels qui la définissent (L , S) et l'implantation de l'interface permet de contrôler la zone de cohésion en elle-même en contrôlant par exemple son centre ($S = (S - L)/2$) et sa taille ($L = S - L$).

VI. Structure d'un modèle utilisant le contrôle de paramètres

Nous allons à présent décrire la structure globale d'un modèle utilisant le contrôle de paramètres tel que nous l'avons spécifié pour Mimesis. Les éléments qui nous intéressent dans de tels modèles sont :

- Le contrôlé : un LIA et un paramètre
- Le contrôleur: un MAS 1D et le module de contrôle de paramètres (identité, linéaire ou exponentiel).
- Le comportement du contrôleur.

Le comportement du contrôleur peut être déterminé de trois manières différentes :

1. Par un fichier geste enregistré contrôlant de manière unilatérale (sans retour haptique par exemple) un modèle contrôlé. Il s'agit là de la modalité de contrôle 1 que nous avons identifiée comme « contrôle prédéfini ».

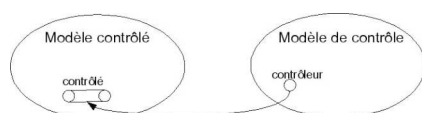


Figure 8: Modalité de contrôle 1

2. Par le comportement propre du contrôleur dans un modèle de contrôle en interaction avec le modèle contrôlé. Il s'agit là de la modalité de contrôle 2 que nous avons identifiée comme « Déterminée en ligne par

l'animateur», étendu au contrôle possible avec retour d'effort.

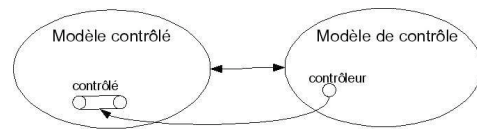


Figure 10 : Modalités de contrôle 2

3. Par une donnée en provenance du modèle contrôlé. L'acquisition de cette donnée peut être réalisée de manière à négliger son influence sur le modèle contrôlé. Il s'agit là de la modalité de contrôle 3 que nous avons identifiée comme « définie à chaque instant par l'état du système ».

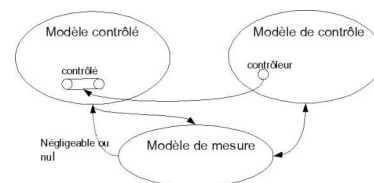


Figure 9 : Modalités de contrôle 3

On saisit bien ici les possibilités qu'offre la dimension modulaire du contrôle de paramètres tel que nous le proposons. Les deux exemples typiques que nous avons mis en œuvre sont basés sur la modalité 3.

VII. Exemples d'application:

Nous avons sélectionné deux cas types très différents, un mouvement humain et un phénomène physique, où le contrôle de paramètre physique « dépendant à chaque instant de l'état du système » est constitutif des mouvements obtenus :

- le saut à pieds joints répété
- le phénomène de fracture par striction

Le saut à pieds joints répété

Sauter plusieurs fois d'affilée à pieds joints suppose une modification en ligne du système locomoteur (par exemple, changement du tonus des muscles en fonction de la phase des sauts). Le modèle proposé ne vise pas à donner un modèle biomécanique exact du sauteur mais de valider la possibilité de succession des sauts par changement de paramètres physiques du bipède. Pour cela, on modélisera

uniquement la partie inférieure d'un bipède (deux jambes et un bassin), pouvant effectuer plusieurs sauts à pieds joints sous l'effet de cycles contraction/extension. Un cycle commence lorsque les pieds retombent au sol. Une jambe est composée de deux moitiés symétriques, la jambe et l'anti-jambe, elles sont connectées par des interactions ressort-frottement horizontalement au niveau du genou pour assurer la morphologie et la stabilité de la jambe, et verticalement pour assurer sa locomotion. Le muscle qui relie donc le bassin au pied, représente l'ensemble des muscles de la jambe et du pied. Le contact avec le sol est modélisé par une butée de seuil S très important qui relie le pied à un SOL situé à $y=-S$. Ainsi lorsque le pied est à $y=0$, il est en contact avec le sol.

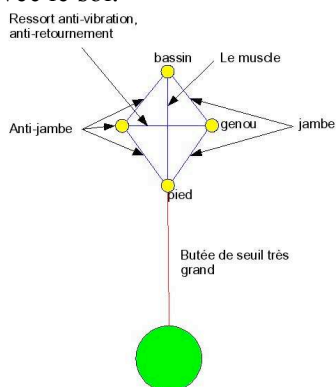


Figure 11: modèle de saut (une jambe)

Il nous faut à présent contrôler le muscle pour effectuer adéquatement des cycles contraction/extension. On mesure ici l'instant où les pieds retouchent le sol, le début d'un cycle, avec comme effet de bord la mesure de la force de percussion du sol. On contrôle la longueur à vide du muscle :

- muscle contracté : $L_0=L_{\min}$
- muscle étendu : $L_0=L_{\max}$

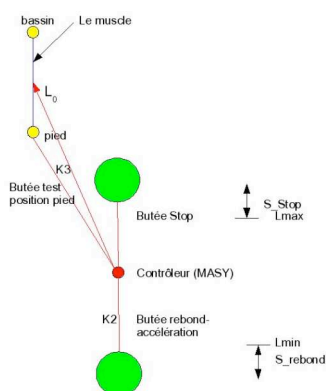


Figure 12 : Modèle de mesure et de contrôle du saut

La butée "test position pied" est une BUTY, on teste en effet la position verticale du pied. La butée Stop est une butée visqueuse non élastique, la butée rebond-accelération est une butée strictement élastique. Le contrôleur évolue donc entre L_{\min} et L_{\max} via la transformation effectuée par le CPL (en effet la masse qui contrôle se trouve en fait "sous terre"): lorsque le pied retombe, il percute le contrôleur, et la longueur à vide diminue (contraction). Arrivé en bout de course, le contrôleur rebondit, et la longueur à vide augmente (extension), jusqu'à être bloqué par la butée Stop.

Examinons à présent les paramètres qui nous permettent de maîtriser ces cycles. Il nous faut d'abord considérer des paramètres d'ordre phénoménologique:

- Vitesse d'extension (V_{ext}): c'est la vitesse d'ascension du contrôleur.
- Vitesse de contraction (V_{cont}): c'est la vitesse de descente du contrôleur.
- Hauteur du saut (H_{saut}): c'est la hauteur maximale du pied pendant un saut.

Ces trois paramètres changent bien évidemment à chaque cycle. L'enjeu est de maîtriser ces paramètres à partir des paramètres physiques du modèle de contrôle et de mesure. On parvient alors au mouvement souhaité sur un nombre raisonnable de cycles.

Ce modèle réalise un cas de motricité avec retour kinesthésique du monde extérieur. Le contrôle moteur exercé ici est très simple : "je fléchis les jambes quand je retombe au sol, lorsque j'ai fini de fléchir, je les étends assez vite". Ce contrôle est certes simple, mais il nécessite une intelligence sensori-motrice qui réside ici dans le modèle de contrôle et de mesure.

Phénomène de striction-fracture : la goutte.

Le phénomène de striction advient après qu'une élasticité ait dépassé le seuil de plasticité et que le matériau soit prêt à se rompre. Un certain seuil d'étirement étant atteint, le ressort "casse", la force de rappel devenant plus faible que la force exercée pour étirer le ressort. Un phénomène similaire, celui du goutte-à-goutte du robinet, permet d'observer ce phénomène: la goutte est attirée

vers le bas par son poids et retenue par une cohésion avec le robinet et l'eau restante. Ce phénomène est d'autant plus facile à observer que le liquide est visqueux (miel).

Dans notre modèle, le robinet devient une boule fixe avec laquelle la goutte va interagir de la manière suivante :

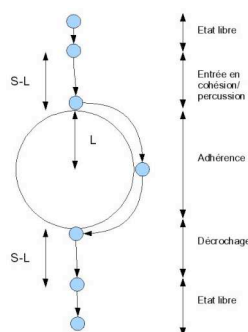


Figure 13 : Les phases successives du phénomène modélisé

La base de notre modèle est donc très simple : une masse ponctuelle fixe (SOL), en interaction de cohésion (fig 5) avec une masse ponctuelle mobile, la goutte.

Quel contrôle allons nous assurer sur ce modèle pour réaliser la striction? Il s'agit de modifier la raideur de la cohésion au moment adéquat, pour obtenir ce lent décrochage que nous recherchons.

Ce moment adéquat se situe grossièrement à l'instant où la goutte arrive en bas de la sphère. Deux contrôles sont possibles sur la liaison cohésion pour obtenir cet effet:

- Soit contrôler l'élasticité K_1 de l'interaction de cohésion (voir figure 14)
- Soit contrôler le seuil S de cette même interaction (voir Figure 15)

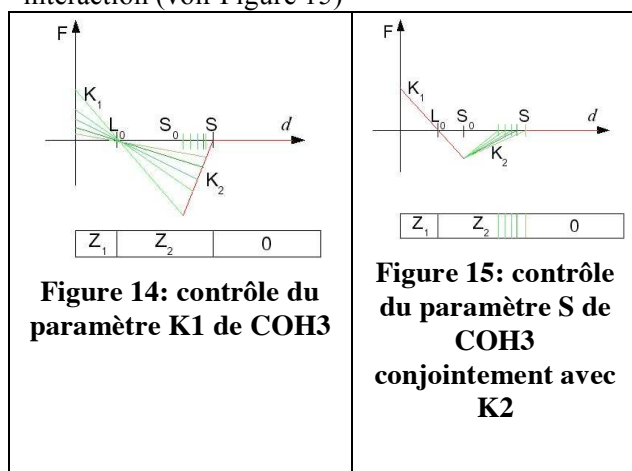


Figure 14: contrôle du paramètre K_1 de COH3

Figure 15: contrôle du paramètre S de COH3 conjointement avec K_2

Dans le deuxième cas, nous avons en effet fait le choix de garder fixe le paramètre S_0 (auquel

l'utilisateur n'a pas directement accès) pour pouvoir moduler K_2 .

Ces deux contrôles correspondent à deux types de décrochages très différents.

Dans le contrôle de K_1 , on remarque que plus K_1 est faible plus la force de rappel maximum F_{rMax} est faible. La force de rappel permet de contrer le poids de la goutte et sa quantité de mouvement, donc si $F_{rMax} < \text{poids}$ la goutte décroche, ce décrochage pouvant arriver avant si la quantité de mouvement n'est pas négligeable. La décroissance de K_1 entraîne donc la goutte vers le bas (la goutte descend comme pour trouver un nouvel état d'équilibre) jusqu'au décrochage.

Dans le contrôle de S , on observe que F_{rMax} est fixé. Donc pour qu'il y ait décrochage, il faut qu'avant même le contrôle $F_{rMax} < \text{poids}$. Le contrôle est ici donc très différent puisqu'il ne va pas entraîner le décrochage mais le ralentir, l'accompagner.

Le contrôle est mis en œuvre à l'aide d'un dispositif semblable à celui utilisé pour le saut répété.

VIII. Conclusion

Le contrôle de paramètres nous permet d'aborder au moins deux problèmes d'une manière nouvelle : la modélisation de figures motrices ainsi que des phénomènes faisant intervenir des non linéarités complexes, car dynamiques. Pour les figures motrices, la nouveauté réside dans la modélisation physique d'une intelligence primaire motrice. Le modélisateur a ainsi prise sur le contrôle moteur lui-même, sur ce lien entre les sens et les muscles. Cette liberté nous semble intéressante car le modélisateur/animateur n'est pas un simple scénariste du mouvement, comme le suggèrent la plupart des logiciels d'animation de personnages, il compose le mouvement et l'intention qui le provoque. Quant à la modélisation de non-linéarités complexes, la nouveauté est dans la continuité du changement du paramètre, ainsi que dans la manière de maîtriser son évolution. La présence dans Mimesis de cet outil laisse le champ libre à l'expérimentation: sphère dynamique d'évitement pour les mouvements de foule, changements d'état (fluide, pâte, gel, liquide, granulaire), motricité...

Le contrôle de paramètre demeure cependant complexe à maîtriser, le modélisateur doit savoir définir les plages de variation adéquates ainsi que la dynamique de ces variations. De plus, les moyens de contrôle sont encore à parfaire sous Mimesis pour assister le modélisateur dans tâche. En effet, la modélisation n'est pas un exercice facile : plus de maîtrise sur le mouvement suppose certes une interaction plus riche avec l'outil de création, mais requiert un véritable savoir faire en modélisation physique. La modélisation physique est un Art, et tout Art se cultive et se travaille.

IX. Références bibliographiques

[BL03] P. Boulenguez, A. Luciani. A Physical Particle Model of Morphogenesis. WSCG'03 Plzen (République Tchèque).

[BPV88] P. Bergé, Y. Pommeau, Ch. Vidal. L'ordre dans le chaos, vers une approche déterministe de la turbulence. Herman Editeur des Sciences et des Arts 1988(Paris).

[CLF90] C. Cadoz, A. Luciani, J.L. Florens. Cordis-Anima Système de Modélisation et de Simulation d'Instruments et d'Objets Physiques pour la Création Musicale et l'Animation d'Images. Actes du Colloque International sur les Modèles physiques, Grenoble 1990, Edition de la Maison des Sciences de l'Homme. 1994.

[ELC06] M. Evrard, A. Luciani, N. Castagné. MIMESIS : Interactive Interface for Mass-Interaction Modeling, In Proceedings of CASA 2006, Geneva, July 2006, Nadia Magnenat-Thalmann & al. editors. pp177-186.

[GT95] R. Grzeszczuk and D. Terzopoulos. Automated learning of muscle-actuated locomotion through control abstraction. In S. G. Mair and R. Cook, editors, *Automated learning of muscle-actuated locomotion through control abstraction*, pages 63–70, Los Angeles, California, August 1995. SIGGRAPH'95, ACM Press (New York, USA).

[GTH98] R. Grzeszczuk, D. Terzopoulos, and G. Hinton. Neuroanimator: fast neural network emulation and control of physics-based models. In S. Cunningham, W. Bransford, and M. F. Cohen, editors,

Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 9–20, Orlando, Florida, July 1998. SIGGRAPH'98, ACM Press (New York, USA).

[LJFCR91] A. Luciani, S. Jimenez, J.L. Florens, C. Cadoz, O. Raoult. Computational Physics : A Modeler-Simulator For Animated Physical Objects. Eurographics'91, Elsevier, Vienne (Autriche), 1991.

[Mil88] G. S. P. Miller. The motion dynamics of snakes and worms. In *Computer Graphics*, volume 22, pages 169–178. SIGGRAPH'88, ACM Press (New York, USA), August 1988.

[PF93] M. van de Panne and E. Fiume. Sensor-actuator networks. In M. C. Whitton, editor, *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 335–341, Anaheim, California, August 1993. SIGGRAPH'93, ACM Press (New York, USA).

[PKF94] M. van de Panne, R. Kim, and E. Fiume. Virtual Wind-up Toys for Animation. *Graphics Interface*, pp. 208--315, 1994.

[TPK89] D. Terzopoulos, J. Platt and K. Fleisher. Heating and melting deformable models: from goop to glop. In *Graphics Interface'89*, pages 219-226. 1989.

[TT94] X. Tu and D. Terzopoulos, Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior. In *Computer Graphics*, volume 28, pages 43–49. SIGGRAPH'94, ACM Press (New York, USA), August 1994.